

На правах рукописи

Сахарова Елена Юрьевна



Совершенствование методик обработки космических снимков
в системе регионального мониторинга состояния сельскохозяйственных культур

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – кандидат технических наук
Кулик Екатерина Николаевна.

Официальные оппоненты:

Нехин Сергей Степанович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных», начальник управления фотограмметрических исследований;

Глушкова Надежда Владимировна, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий и дистанционного зондирования.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова» (г. Улан-Удэ).

Защита состоится 20 декабря 2018 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/sakharov-elena>

Автореферат разослан 26 октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 17.10.2018. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 158.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Поскольку основой продовольственной безопасности страны служат валовые сборы зерна, важность развития сельского хозяйства невозможно недооценить. Актуальной задачей при прогнозировании урожайности зерновых культур является оценка их состояния в пределах крупных административных единиц, таких как область или край. Выполнение наземных маршрутных агрометеорологических обследований позволяет получать достоверные данные, однако, ввиду обширности исследуемой территории, такие наблюдения носят нерегулярный характер как по времени, так и по пространственному охвату. Поэтому наряду с натурными измерениями важно развивать дистанционные методы, которые являются важным элементом эффективного информационного обеспечения сельскохозяйственной отрасли.

Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур обеспечивает объективный и регулярный контроль развития посевов, оценки продуктивности культур и целевого использования земель сельскохозяйственного назначения. Методики обработки спутниковых данных с целью оценки состояния посевов ориентированы на глобальный анализ спектрально-динамических характеристик культур без учета региональных агрометеорологических особенностей и многолетних детальных статистических данных об урожайности зерновых культур.

В системе мониторинга состояния зерновых культур качество и оперативность оценки посевов зависят от результатов выявления пахотных земель. Существующие методики создания глобальных карт посевных площадей Российской Федерации базируются на основе обработки космических снимков низкого пространственного разрешения, однако для определения пахотных земель на региональном уровне требуется применение более детальной спутниковой информации. Следовательно, совершенствование методик обработки космических снимков для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и выявления посевных территорий в системе регионального мониторинга является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы. Вопросами разработки методов и средств спутникового мониторинга земель сельскохозяйственного назначения занимается ряд отечественных научных организаций: Институт космических исследований РАН, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, компания «Совзонд», Институт биофизики СО РАН, Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Значительный вклад в развитие методов обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и использования спутниковых данных для целей сельскохозяйственного производства внесли российские и зарубежные ученые: Журкин И. Г., Малинников В. А., Гук А. П., Лупян Е. А., Барталев С. А., Чибуничев А. Г., Пяткин В. П., Бучнев А. А., Цибульский Г. М., Егоров В. А., Уваров И. А., Савин И. Ю., Страшная А. И., Клещенко А. Д., Сидько А. Ф., Терехин Э. А., Genovese G., Royer A., Терехов А. Г., Султангазин У. М., Муратова Н. Р., Куссуль Н. Н., Скакун С. В., Шелестов А. Ю., Леонтьев А. А. и др.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационного исследования заключается в совершенствовании методик обработки многоспектральных космических снимков в системе регионального мониторинга для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и выявления пахотных земель.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

- выполнить анализ существующих методик обработки спутниковых данных для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и выявления пахотных земель;
- усовершенствовать методику обработки многозональных космических снимков для определения состояния посевов зерновых культур в системе регионального мониторинга;

- выполнить анализ сезонной изменчивости значений индекса вегетации пахотных земель по данным, полученным космическим аппаратом (КА) Terra с учетом региональных агрометеорологических особенностей;
- усовершенствовать методику обработки космических снимков среднего пространственного разрешения для выявления пахотных земель на региональном уровне;
- выполнить экспериментальные исследования предложенных методик обработки данных ДЗЗ с целью мониторинга состояния посевов зерновых культур на сельскохозяйственных угодьях юга Западной Сибири.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является региональный мониторинг состояния сельскохозяйственных культур.

Предметом исследования являются методики обработки многоспектральных космических снимков в системе регионального мониторинга для оценки состояния посевов зерновых культур и выявления пахотных земель.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- усовершенствована методика обработки космических снимков для оценки состояния посевов на региональном уровне посредством использования рассчитанных пороговых диапазонов индекса вегетации на каждый день вегетационного периода, учета региональных агрометеорологических особенностей и многолетних детальных статистических данных об урожайности зерновых культур, что позволило повысить достоверность информационного обеспечения сельскохозяйственной отрасли;
- усовершенствована методика обработки космических снимков среднего пространственного разрешения для определения пахотных земель, обеспечивающая детальный учет используемых земель сельскохозяйственного назначения на региональном уровне, что позволяет повысить объективность оценки состояния посевов зерновых культур.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что усовершенствована методика обработки спутниковых данных для определения состояния посевов зерновых культур за счет использования пороговых диапазонов индекса вегетации, установленных на основе анализа многолетних эмпирических данных. Предложена методика выявления используемых пахотных земель по космическим снимкам среднего пространственного разрешения на основе проведенного анализа сезонной изменчивости индекса вегетации для определения временных периодов снижения вегетационной активности и соответствующих им диапазонов индексов вегетации. Использование усовершенствованных методик позволяет реализовать систему эффективного регионального мониторинга.

Практическая значимость работы состоит в том, что методики обработки спутниковых данных позволяют выполнять оперативный мониторинг состояния сельскохозяйственных культур на региональном уровне с представлением результатов в виде карт, отражающих площади пахотных земель с различным состоянием посевов. Разновременные карты состояния зерновых культур, полученные за один вегетационный период, позволяют оценить динамику развития посевов и являются показателем ожидаемой продуктивности возделываемых культур.

Методология и методы исследований. В качестве методологической основы использованы методы визуального дешифрирования, статистического анализа и обработки спутниковых изображений с применением современных геоинформационных систем. Эмпирической основой исследований служили снимки с КА Terra и Landsat, статистические значения урожайности зерновых культур на исследуемых территориях (за период с 1985 по 2017 г.), архивные и оперативные данные о расположении культур на полях сельскохозяйственных предприятий Новосибирской области, база данных вегетационных индексов на тестовых участках. Методика выявления пахотных земель по космическим снимкам среднего пространственного разрешения позволяет осуществлять де-

тальный учет используемых сельскохозяйственных земель для объективной оценки состояния посевов зерновых культур на региональном уровне.

Положения, выносимые на защиту:

– методика обработки космических снимков в системе регионального мониторинга состояния посевов зерновых культур по трем градациям, принятым в агрометеорологии, на основе использования эмпирических пороговых диапазонов индекса вегетации;

– методика обработки многоспектральных космических снимков среднего пространственного разрешения для выявления пахотных земель.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует областям исследования: 4 – Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследований; 5 – Теория и технология получения количественных характеристик динамики природных и техногенных процессов с целью их прогноза паспорта научной специальности 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты выполненных исследований представлены:

– на X и XIII всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (12–16 ноября 2012 г., Москва и 16–20 ноября 2015 г., Москва);

– всероссийской конференции с международным участием «Применение космических технологий для развития арктических регионов» (17–19 сентября 2013 г., Архангельск);

– VII Зерновом круглом столе «Сценарии развития цен на зерно на внутреннем рынке в 2013/14 МГ» (21 ноября 2013 г., Новосибирск);

– объединенном научном семинаре СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» и ИВМиМГ СО РАН (8 апреля 2014 г., Новосибирск);

– международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015» (13–25 апреля 2015 г., Новосибирск) и «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (23–27 апреля 2018 г., Новосибирск);

– I, II и III международных научных конференциях «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (23–26 сентября 2014 г., Красноярск; 22–25 сентября 2015 г., Красноярск; 13–16 сентября 2016 г., Красноярск).

Усовершенствованные методики применяются в Сибирском центре Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета») и отделах агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра РФ для оценки эффективности использования сельскохозяйственных земель южных территорий Западной Сибири.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационного исследования представлены в 14 научных работах, три из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Получено два свидетельства о государственной регистрации базы данных.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 119 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 107 наименований, содержит 25 таблиц, 29 рисунков и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования.

В первом разделе диссертации рассмотрены возможности использования данных ДЗЗ для мониторинга сельскохозяйственных земель, сформулированы требования, предъявляемые к спектральным характеристикам, пространственному разрешению и периодичности выполнения повторной съемки территории, представлены характеристики космических и беспилотных летательных аппаратов, данные с которых активно применяются при изучении характеристик сельскохозяйственных культур, описаны различные методики расчета урожайности культур, методики обработки спутниковых данных для выявления состояния посевов, разработанные в рамках сотрудничества Гидрометцентра России с ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии» и Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Обзор публикаций показал, что информационное обеспечение сельскохозяйственной сферы реализуется как на локальном, так и глобальном уровнях. Среди зарубежных сервисов глобального спутникового мониторинга можно выделить следующие: «Мониторинг сельскохозяйственных ресурсов» (Monitoring Agriculture through Remote Sensing techniques, MARS), «Национальная сельскохозяйственная статистическая служба США» (National Agricultural Statistics Service, NASS), «Система космического сельскохозяйственного мониторинга Китая» (China Agriculture Monitoring with Remote Sensing, CHARMS). Российские разработки – это «ВЕГА-PRO» (ИКИ РАН), «Геоаналитика.Агро» (Компания «Совзонд»). Эти сервисы осуществляют сбор, предварительную обработку, архивирование, тематическую обработку и анализ данных ДЗЗ, визуализацию полученных результатов в приемлемом для конечного пользователя виде.

Большинство проведенных исследований, связанных с мониторингом сельскохозяйственных ресурсов на глобальном уровне, основано на использовании снимков с КА Terra. Анализ публикаций и опыт выполнения мониторинговых работ в СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» показали, что для обеспечения регионального мониторинга состояния посевов целесообразно применять снимки с КА Terra, тогда как для выявления пахотных земель на региональном уровне

необходимо использовать материалы спутниковой съемки среднего пространственного разрешения, например, данные с КА Landsat.

Во втором разделе диссертации представлены методики обработки космических снимков с целью оценки состояния посевов зерновых культур и выявления пахотных земель.

С 2005 г. в СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» реализована система регионального мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, обеспечивающая прогнозирование урожайности зерновых культур. С целью расширения функциональных возможностей системы регионального мониторинга земель сельскохозяйственного назначения усовершенствована методика обработки космических снимков для оценки состояния посевов зерновых культур (рисунок 1), основанная на базе знаний, сформированной накоплением многолетних статистических данных при прогнозировании ожидаемой урожайности.



Рисунок 1 – Схема регионального космического мониторинга состояния посевов и прогноза урожайности зерновых культур

Для прогнозирования урожайности зерновых культур в соответствии с рекомендациями главных агрономов административных районов ежегодно уточнялся перечень тестовых хозяйств. Каждому полю сельскохозяйственного предприятия соответствовал свой набор реперных точек для автоматического измерения нормализованных относительных индексов вегетации (NDVI), рассчитанных по снимкам с КА Terra. Каждый вегетационный сезон с 1 июня по 20 июля индексы NDVI в пределах каждого поля измерялись минимум на три даты: два июньских дня и один день в июле, отражающий максимальное значение вегетационного индекса. На завершающем этапе прогноза выполнялся расчет ожидаемой урожайности зерновых культур по каждому отдельному полю, в среднем по хозяйству и по каждому административному району. Для расчета величины ожидаемой урожайности зерновых культур использовалась имитационная модель SDIM (System of Databases and Imitating Modeling), реализующая американскую модель биопродуктивности EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator). Основным параметром для определения ожидаемой урожайности в программном комплексе SDIM служит индекс NDVI, рассчитываемый по снимкам с КА Terra, а также дата посева, предварительная дата уборки урожая (для каждого поля) и климатические параметры (для каждого района): максимальная и минимальная температуры воздуха, количество суточных осадков, относительная влажность воздуха, средняя скорость ветра, суммарная солнечная радиация.

Полученные результаты ежегодных прогнозов формировали базу данных и передавались в Росгидромет, районные управления сельского хозяйства Новосибирской области и руководителям хозяйств. В отделы агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» и ФГБУ «Алтайский краевой центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» предоставлялась информация о прогнозе урожайности зерновых культур по административным районам Новосибирской области и Алтайского края соответственно, для прогнозирования баланса зерна по России.

Показателем качества определения ожидаемой урожайности зерновых культур служила оправдываемость прогноза (γ), которая рассчитывалась после получения из Министерства сельского хозяйства данных о фактической урожайности.

При расчетах оправдываемости оперативного агрометеорологического прогноза использовалась формула

$$\gamma = 100 \% - \left| \frac{u_{\text{п}} - u_{\text{ф}}}{u_{\text{ф}}} \right| 100 \%, \quad (1)$$

где $u_{\text{ф}}$ – фактическая величина урожайности;

$u_{\text{п}}$ – прогнозируемая величина урожайности.

В таблице 1 приведены результаты выполненной оценки качества прогнозирования урожайности зерновых культур (яровой пшеницы) в Новосибирской области с 2005 по 2017 г.

Таблица 1 – Оправдываемость прогноза урожайности яровой пшеницы по хозяйствам и районам Новосибирской области

Оправдываемость прогноза урожайности	Год мониторинга													Средняя оправдываемость прогнозов, %
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Хозяйства, %	74	76	80	80	80	82	82	-	69	81	81	79	86	79
Районы, %			90	83	87	87	85	67	66	79	83	85	79	81
Область, %				84	88	93	96	73	71	97	92	100	80	87

Качество прогноза, в соответствии с Инструкцией по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов, определялось по следующей шкале: оправдываемость прогноза больше 90 % – 5 баллов, от 81 до 90 % – 4 балла, от 70 до 80 % – 3 балла, меньше 70 % – 0 баллов. Следовательно, можно сделать вывод, что результаты определения ожидаемой урожайности соответствовали оценкам «хорошо» и «удовлетворительно». Данные оценки качества прогноза свидетельствуют о достоверности информации формируемых баз данных. Таким образом, на основе многолетнего выполнения работ по прогнозированию

ожидаемой урожайности (с 2005 по 2018 г.) была сформирована база знаний, которая содержит архив измеренных индексов NDVI на тестовых полях, архив статистических значений урожайности зерновых культур по сельскохозяйственным предприятиям Новосибирской области, районам Новосибирской области и Алтайского края, а также банк архивных снимков с КА Terra.

В агрометеорологии принято характеризовать состояние посевов в определенный сезон соответствующей оценкой (хорошее, удовлетворительное, плохое). В предложенной методике в качестве основного показателя развития посевов используется значение индекса вегетации. Этот показатель позволяет дать соответствующую оценку посевов с учетом совокупности параметров, влияющих на их продуктивность (густота стояния, высота растений, изреженность и засоренность). Каждой оценке соответствует свой интервал индексов вегетации, полученный эмпирическим путем на основе анализа многолетних данных. Набор таких интервалов позволяет разделить посевы на три градации. По величине средней многолетней урожайности зерновых культур (яровой пшеницы) за период с 2001 по 2011 г. сельскохозяйственные предприятия Новосибирской области разделены на три группы. С использованием сведений из базы знаний определены пороговые значения индекса NDVI, положенные в основу методики обработки космических снимков для оценки состояния посевов зерновых культур. Для каждой группы сельскохозяйственных предприятий (с высокой, средней и низкой урожайностью) установлен свой набор пороговых значений индекса NDVI, позволяющий оценить состояние посевов зерновых культур по трем градациям.

Сущность усовершенствованной методики обработки космических снимков для оценки состояния посевов заключается в следующем. Первоначально выполняется предварительная обработка оперативных снимков с КА Terra, в результате которой исключаются изображения территорий, экранированных облачностью. По полученным изображениям рассчитываются индексы NDVI, затем индексное изображение совмещается с векторным слоем пахотных земель. Затем выполняется оценка состояния посевов на основе классификации вегета-

ционных индексов по трем градациям в соответствии с пороговыми значениями. После этого формируется карта состояния посевов путем совмещения информации о площади посевов (в процентах) различного состояния с тематическими слоями (элементами гидрографии, населенными пунктами, границами административных районов).

Для выявления пахотных земель усовершенствована методика обработки спутниковых данных низкого и среднего пространственного разрешения. Снимки с КА Terra применяются для определения временного периода перепахивания земель сельскохозяйственного назначения, снимки с КА Landsat – для выявления границ используемых пахотных земель.

При возделывании сельскохозяйственных культур соблюдается определенная система севооборота, которая сопровождается сменой вида произрастающих культур и периодической вспашкой земли. Идея определения используемых пахотных земель по космическим снимкам заключается в выделении полей, которые подвергаются периодической вспашке в течение вегетационного периода. Чем интенсивнее обрабатывается земля, тем чаще она распахивается, следовательно, чаще наблюдается снижение вегетационной активности. Для выявления используемых пахотных земель в первую очередь определяется, в какой временной промежуток (с мая по сентябрь) наиболее часто встречается минимальное покрытие пашни растительностью или полное ее отсутствие. Индикатором минимального покрытия пашни растительностью при выявлении по снимку служат значения индекса NDVI от 0,18 до 0,20. Однако указанный диапазон значений индекса NDVI не позволяет однозначно выделить территорию пашни. В этот диапазон значений NDVI также попадает облачность и антропогенные объекты (элементы городской застройки, автомобильные дороги и др.), поэтому необходимо ввести дополнительные критерии отбора, отражающие геометрические особенности сельскохозяйственных полей (ограничение минимальной площади объекта, значение отношения периметра объекта к его площади).

Усовершенствованная методика обработки многоспектральных космических снимков для выявления пахотных земель включает следующие этапы:

- выявление временных периодов, соответствующих перепахиванию земель. Для этого используются индексы вегетации в реперных точках, полученные по снимкам с КА Terra в автоматическом режиме;
- подбор снимков с КА Landsat на даты, соответствующие вспашке земель;
- исключение изображений водных объектов, снега, облачности в процессе обработки снимков с КА Landsat на основе пороговых значений, соответствующих каждому типу покрытия. В изображении оценки качества данных с КА Landsat (BQA – Band Quality Assessment) содержатся значения, описывающие принадлежность каждого пикселя изображения определенному типу покрытия;
- определение границ участков пахотных земель по снимкам с КА Landsat.

Использование усовершенствованной методики позволяет выявить участки пахотных земель для объективной оценки состояния посевов и определения заброшенных сельскохозяйственных земель (не обрабатываемые на протяжении трех лет) путем сравнения результатов обработки снимков за два смежных трехлетних периода.

В третьем разделе приведены результаты экспериментальных исследований усовершенствованных методик обработки космических снимков для оценки состояния посевов зерновых культур и выявления используемых пахотных земель.

Оценка состояния посевов зерновых культур выполнена для территорий сельскохозяйственных угодий юга Западной Сибири: Омской, Новосибирской и Кемеровской областей, а также Алтайского и Красноярского краев. В результате для большинства административных единиц на различные даты каждого вегетационного периода с 2012 по 2018 г. созданы карты состояния посевов зерновых культур с информацией о площадях пахотных земель (в процентах) с различным состоянием посевов, которые позволили оценить динамику развития культур (рисунок 2).

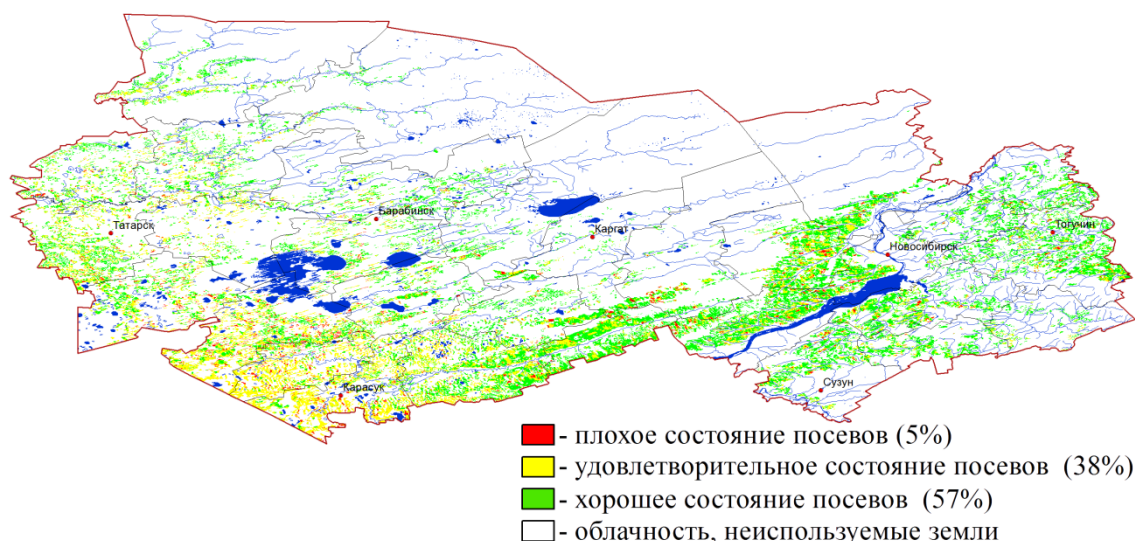


Рисунок 2 – Пример созданной карты состояния посевов зерновых культур в Новосибирской области на 16 июля 2018 г. по данным с КА Terra

Для выявления периодов перепахивания земель выполнен анализ значений вегетационных индексов по ряду хозяйств Новосибирской области с 2013 по 2016 г. В выборке участвовало пять тестовых хозяйств Ордынского района, семь хозяйств Сузунского района, пять хозяйств Коченевского района и пять хозяйств Искитимского района. В качестве примера приведены результаты анализа характера изменения индексов вегетации на полях с известными культурами и тестовых полях с неизвестной возделываемой культурой в Ордынском районе Новосибирской области за 2016 г. (рисунок 3).

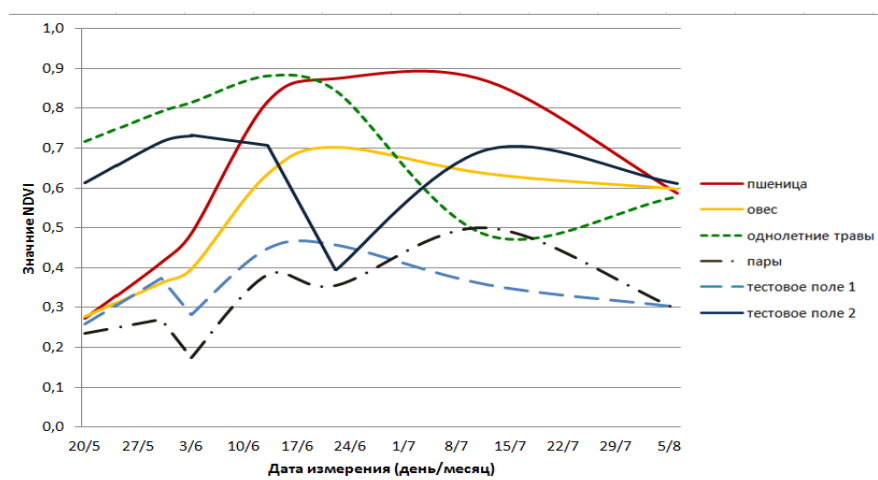


Рисунок 3 – Динамика значений NDVI по данным с КА Terra для определения периодов перепахивания земель

Из анализа графиков, представленных на рисунке 3, установлено:

- за вегетационный период наблюдалось снижение вегетационной активности на паровом поле, тестовом поле 1 и тестовом поле 2;
- вспашка земли производилась на паровом поле в первой декаде июня, на тестовом поле 2 – в третьей декаде июня;
- индекс вегетации вспаханной почвы принимает разные значения в разные промежутки времени в зависимости от состояния почвы, климатических условий и даты проведения съемки.

На основе анализа значений индекса NDVI на территории тестовых полей выявлены временные периоды вспашки земель и соответствующие им диапазоны значений индекса вегетации (рисунок 4).

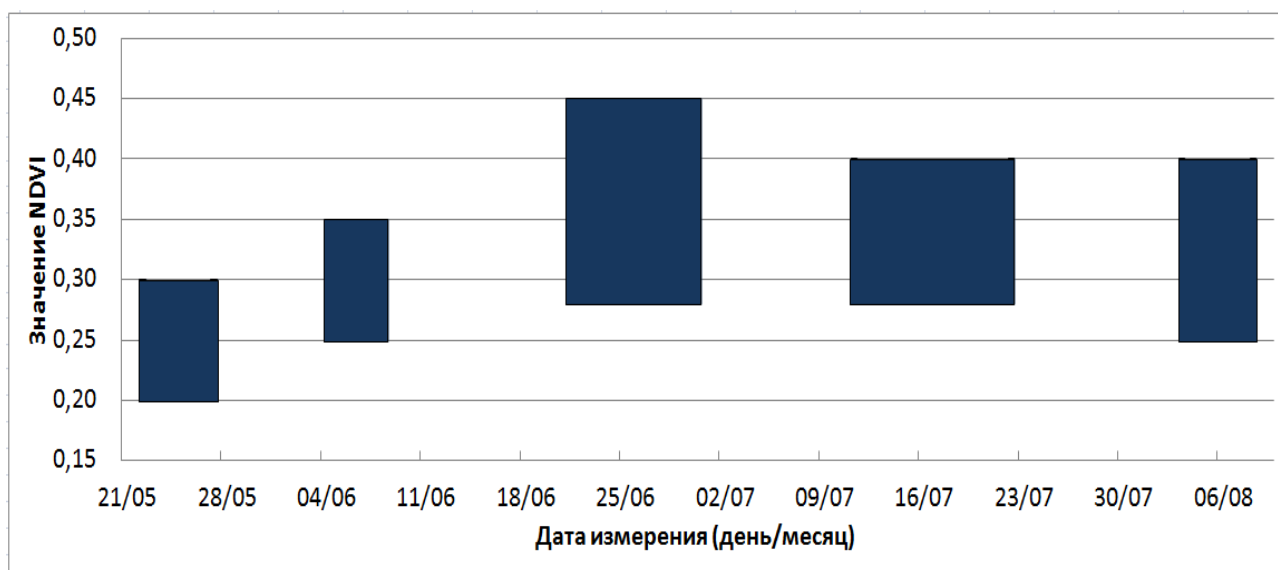


Рисунок 4 – Установленные диапазоны значений NDVI по снимкам с КА Terra в зависимости от периодов перепашивания земель

В соответствии с временными периодами, приведенными на рисунке 4, для определения участков пахотных земель осуществлен выбор спутниковых снимков с КА Landsat, по которым рассчитаны индексы вегетации. На основе диапазона значений индекса вегетации (см. рисунок 4) выявлены обрабатываемые пашни и выполнена генерализация полученных результатов для даль-

нейшей оценки состояния посевов по информации с КА Terra. В качестве критериев генерализации участков заданы параметры, отражающие их геометрические особенности, которые получены эмпирическим путем исходя из фактических величин тестовых полей и пространственного разрешения снимков с КА Terra. Для достоверной оценки состояния посевов минимальная площадь полей задана равной 75 га, а величина отношения периметра объекта к его площади – меньше либо равной 1/50. Фрагмент результата обработки спутниковых данных с КА Landsat для выявления пахотных земель представлен на рисунке 5.

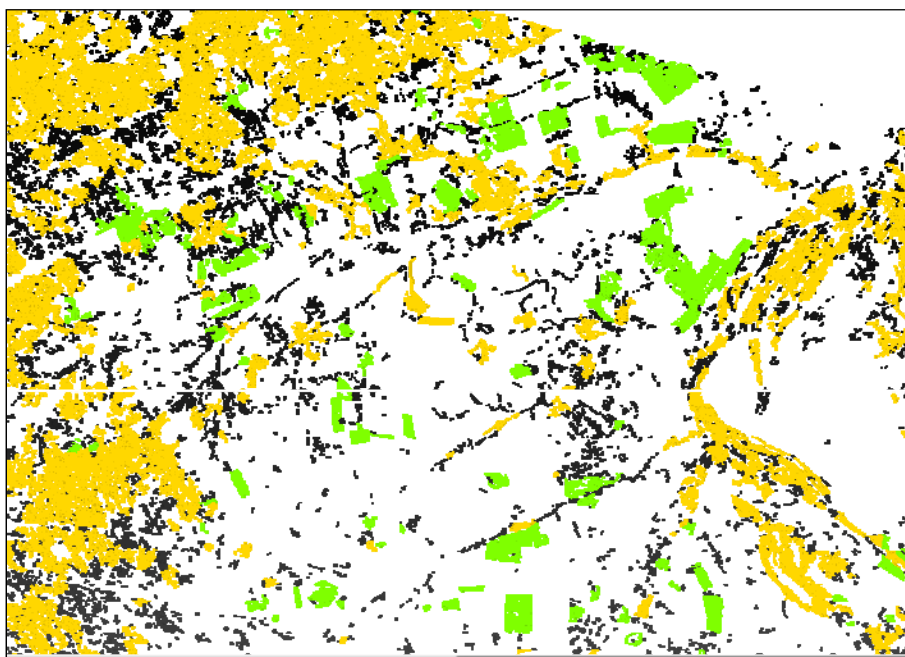


Рисунок 5 – Фрагмент снимка с КА Landsat с участками выявленных пахотных земель

Пахотные земли показаны зеленым цветом, желтым цветом отмечены объекты, не соответствующие критерию отношения периметра к площади объекта, а серым цветом – объекты площадью менее 75 га.

По спутниковым данным с КА Landsat подготовлен векторный слой пахотных земель на территорию Новосибирской области (рисунок 6), который использовался при оценке состояния посевов зерновых культур.



Рисунок 6 – Векторный слой выявленных пахотных земель
Новосибирской области по снимкам с КА Landsat

Для оценки предложенных методик проведено сравнение данных о состоянии посевов, полученных с использованием космических снимков (КА Terra и Landsat), с результатами маршрутных обследований, проведенных специалистами-агрометеорологами гидрометеорологических станций совместно с работниками сельскохозяйственных предприятий. Средняя величина разностей площадей посевов (в процентах) различного состояния, полученных дистанционным и контактными методами за годы проведения наблюдений (с 2012 по 2018 г.), составила: по Новосибирской области – 11 %, по Алтайскому краю – 11 %, по Кемеровской области – 8 %. Результаты выполненных экспериментальных исследований свидетельствуют о достоверности усовершенствованных методик и возможности их практического использования в системе регионального мониторинга земель сельскохозяйственного назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги проверенного исследования заключаются в следующем:

- выполнен анализ существующих методик обработки спутниковых данных с целью оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и выявления пахотных земель, в результате которого установлена необходимость совершенствования системы космического мониторинга сельскохозяйственных земель с учетом региональных особенностей и агроклиматических условий исследуемых территорий;
- усовершенствована методика обработки космических снимков с КА Terra для определения состояния посевов зерновых культур, отличающаяся от существующей использованием пороговых значений индекса вегетации и данных о выявленных пахотных землях, что обеспечивает повышение достоверности и надежности регионального мониторинга сельскохозяйственных угодий;
- выполнен анализ сезонной изменчивости вегетации тестовых посевов на территории Новосибирской области по данным с КА Terra, позволивший установить временные периоды перепахивания земель сельскохозяйственного назначения и соответствующие им диапазоны индексов вегетации;
- усовершенствована методика обработки мультиспектральных спутниковых изображений для выявления границ пахотных земель, основанная на учете региональных особенностей пороговых значений индекса вегетации, сезонности и периодичности обработки земель, что позволяет повысить оперативность обработки снимков среднего пространственного разрешения и обеспечить высокую достоверность оценки состояния посевов зерновых культур;
- проведены экспериментальные исследования усовершенствованных методик обработки данных ДЗЗ по оценке состояния сельскохозяйственных культур на юге Западной Сибири, которые подтвердили возможность их использования при ведении регионального мониторинга состояния посевов. Соз-

данные карты состояния посевов зерновых культур применяются на практике специалистами отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра РФ (Новосибирская, Кемеровская, Омская области, Алтайский и Красноярский края).

Таким образом, в результате проведенного диссертационного исследования поставленная цель, направленная на разработку усовершенствованных методик обработки многоспектральных космических снимков в системе регионального мониторинга состояния сельскохозяйственных культур, позволяющих повысить достоверность оценки состояния посевов, достигнута.

Методики обработки космических снимков рекомендуется использовать для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур на других территориях с учетом их региональных агрометеорологических особенностей.

Перспективы дальнейших исследований состоят в совершенствовании методик обработки данных ДЗЗ для выполнения мониторинга сельскохозяйственных земель на локальном уровне с использованием аэрокосмических снимков высокого пространственного разрешения и гиперспектральных спутниковых данных.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Сладких, Л. А. Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений [Текст] / Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик, Е. Ю. Сахарова // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 6. – С. 726–733.

2 Сахарова, Е. Ю. Применение спутниковых данных для оценки влияния погодных условий на формирование и развитие сельскохозяйственных культур на территории Новосибирской области [Текст] / Е. Ю. Сахарова // Геодезия и картография. – 2016. – № 7. – С. 31–37.

3 Sakharova, E. Yu. Satellite Monitoring of Grain Crops in the South Part of Western Siberia [Text] / E. Yu. Sakharova, L. A. Sladkikh, E. N. Kulik // Journal of SFU. Engineering & Technologies, 2016. – V. 9. – Iss. 7. – P. 1019–1024.

4 Свидетельство о государственной регистрации базы данных. Маски неиспользуемых земель, созданные по спутниковым данным № 2015620936 Российская Федерация [Текст] / Сладких Л. А., Сахарова Е. Ю. ; правообладатель ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (RU) ; дата поступления 17 фев. 2015 г. ; дата государственной регистрации в Реестре баз данных 19 июня 2015 г.

5 Свидетельство о государственной регистрации базы данных. Формирование и хранение многолетних данных спутниковых измерений, характеризующих состояние сельскохозяйственных культур № 2015620924 Российская Федерация [Текст] / Сладких Л. А., Сапрыкин Е. И., Сахарова Е. Ю., Демакова Г. С. ; правообладатель ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (RU) ; дата поступления 17 фев. 2015 г. ; дата государственной регистрации в Реестре баз данных 17 июня 2015 г.

6 Сладких, Л. А. Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений [Текст] / Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик, Е. Ю. Сахарова // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы междунар. науч. конф. – Красноярск : СФУ, 2014. – С. 329–333.

7 Сахарова, Е. Ю. Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур с использованием индекса вегетации [Текст] / Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апр. 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – Т. 1. – С. 47–52.

8 Использование спутниковых данных в сельском хозяйстве [Электронный ресурс] / В. Н. Антонов, Л. А. Сладких, Е. Ю. Сахарова, Е. И. Сапрыкин // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов : труды всероссийской конф. (24–28 авг. 2015 г.) – с. Усть-Сема, Республика Алтай, 2015. – С. 152–156.

9 Сахарова, Е. Ю. Спутниковый мониторинг состояния посевов зерновых культур юга Западной Сибири [Текст] / Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы II Междунар. науч. конф. (Красноярск, 22–25 сент. 2015 г.). – Красноярск : СФУ, 2015. – С. 330–334.

10 Сахарова, Е. Ю. Идентификация сельскохозяйственных культур на основе использования данных дистанционного зондирования Земли [Текст] / Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апр. 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – Т. 1. – С. 21–24.

11 Сахарова, Е. Ю. Идентификация сельскохозяйственных культур по спектральному спутниковым данным [Текст] / Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 13–16 сент. 2016 г.). – Красноярск : СФУ, 2016. – С. 320–323.

12 Сахарова, Е. Ю. Идентификация сельскохозяйственных культур в хозяйствах Тогучинского района [Текст] / Е. Ю. Сахарова, Л. А. Сладких, Е. Н. Кулик // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – Т. 1. – С. 12–16.

13 Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования для эффективных решений задач сельского хозяйства [Текст] / Е. Н. Кулик, В. В. Дедкова, А. С. Заварзина, Е. Ю. Сахарова // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения : сб. материалов Нац. науч.-практ. конф. в 2 ч. (Новосибирск, 14–15 дек. 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – Ч. 1. – С. 158–161.

14 Кулик, Е.Н. Распознавание пахотных земель на основе сезонной изменчивости характеристик растительного покрова [Текст] / Е. Н. Кулик, Е. Ю. Сахарова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 23–27 апр. 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – Т. 1. – С. 3–6.